

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2002-208031  
(P2002-208031A)

(43) 公開日 平成14年7月26日 (2002.7.26)

(51) IntCl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマコード* (参考)
G 0 6 T 15/50	2 2 0	C 0 6 T 15/50	2 2 0 5 B 0 8 0

審査請求 有 請求項の数25 O L (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2001-329764(P2001-329764)

(22) 出願日 平成13年10月26日 (2001.10.26)

(31) 優先権主張番号 60/244040

(32) 優先日 平成12年10月26日 (2000.10.26)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(31) 優先権主張番号 09/899802

(32) 優先日 平成13年7月6日 (2001.7.6)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 391049002

株式会社スクウェア

東京都目黒区下目黒1丁目8番1号

(72) 発明者 シリアック・クアディオ

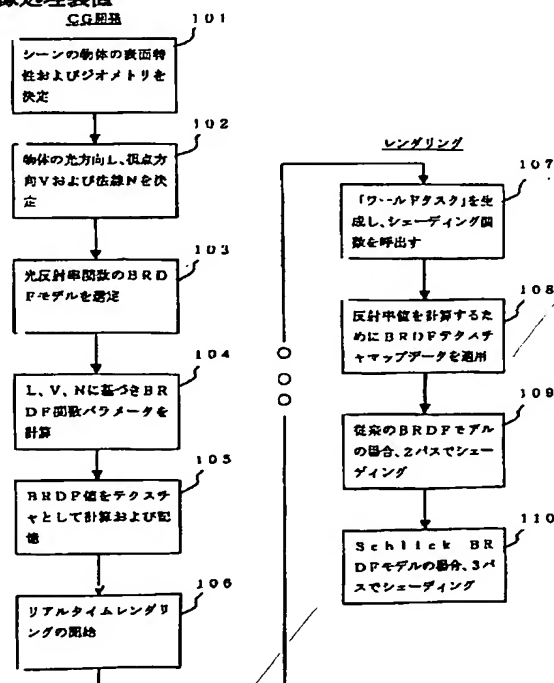
アメリカ合衆国 96813 ハワイ州、ホノ  
ルル、マーチャントストリート 55番地、  
スウィート 3100、スクウェア ユー・エ  
ス・エー インコーポレイテッド内

(74) 代理人 100062007

弁理士 川口 義雄 (外5名)

Fターム(参考) 5B080 AA19 BA08 DA06 GA11 GA15  
GA22(54) 【発明の名称】 サーフェスシェーディング方法、その方法を実現するプログラム、その方法を記録したコンピ  
ュータ読み取り可能な記録媒体、および、画像処理装置

(57) 【要約】

【課題】 リアルタイムCGレンダリングにおいて物理  
的光反射率モデルの使用を可能にするCGのサーフェス  
シェーディング手法を提供することにある。【解決手段】 コンピュータグラフィックス (CG) プ  
ログラムの開発の間にシーン内の物体への所与の光方向  
および視点方向に関するテクスチャマップとして光反射  
率値を計算および記憶し、記憶されたテクスチャマップ  
をリアルタイムレンダリングにおけるシェーディングの  
ために後に使用する。

【特許請求の範囲】

【請求項1】 サーフェスシェーディング方法であつて、  
（a）コンピュータグラフィックス（CG）プログラムの開発の間にシーンの物体の表面の表面特性およびジオメトリパラメータを決定し、  
（b）シーンのフレームについて、物体の表面を照らす入射光方向およびシーンの物体を見る射出光方向を決定し、  
（c）物体の表面の入射光および射出光方向ならびに表面特性およびジオメトリパラメータに基づきシーンのフレーム内の物体の表面からの光反射率に関する法線方向ベクトルの分布のサンプリングのための光反射率値を計算するために選定した双方向反射率分布関数（BRDF）モデルを適用し、  
（d）サンプリングしたBRDF値を、シーンのフレーム内の物体のサーフェスシェーディングのために光反射率のテクスチャマップとして記憶することと、  
（e）シーンのフレーム内の物体の表面上の点について法線方向ベクトルに対応するサンプリングされたBRDF値を適用することによってリアルタイムレンダリングの間に物体のサーフェスシェーディングを実行すること、を含むサーフェスシェーディング方法。  
【請求項2】 法線方向ベクトルの分布が、所与の形式の表面からの物理的光反射率の標準モデルに基づくことを特徴とする請求項1記載のサーフェスシェーディング方法。  
【請求項3】 法線方向ベクトルの分布のサンプリングが、単位画像サイズに正規化された上半球空間の法線方向ベクトルの離散的増分で得られることを特徴とする請求項2記載のサーフェスシェーディング方法。  
【請求項4】 BRDFモデルが、トランスースパロウ（Torrance-Sparrow）モデル、フォン（Phong）モデルおよびストラウス（Strauss）モデルよりなる群から選択されることを特徴とする請求項1記載のサーフェスシェーディング方法。  
【請求項5】 BRDFモデルが修正シュリック（Schlick）モデルであることを特徴とする請求項1記載のサーフェスシェーディング方法。  
【請求項6】 BRDF値が、法線方向ベクトルのサンプリングに索引づけられたルックアップテーブルとして記憶されることを特徴とする請求項1記載のサーフェスシェーディング方法。  
【請求項7】 物体の表面が他の表面テクスチャ特性を備えないものであり、物理的光反射率のサーフェスシェーディングが1パスで実行されることを特徴とする請求項1記載のサーフェスシェーディング方法。  
【請求項8】 物体の表面が他の表面テクスチャ特性によりテクスチャ化されており、物理的光反射率のサーフ

ェスシェーディングが2以上の他のパスで他の表面テクスチャ特性に関するシェーディングと結合されることを特徴とする請求項1記載のサーフェスシェーディング方法。

【請求項9】 コンピュータによりサーフェスシェーディングを実現するプログラムであつて、

（a）コンピュータグラフィックス（CG）プログラムの開発の間にシーンの物体の表面の表面特性およびジオメトリパラメータを決定し、

（b）シーンのフレームについて、物体の表面を照らす入射光方向およびシーンの物体を見る射出光方向を決定し、

（c）物体の表面の入射光および射出光方向ならびに表面特性およびジオメトリパラメータに基づきシーンのフレーム内の物体の表面からの光反射率に関する法線方向ベクトルの分布のサンプリングのための光反射率値を計算するために選定した双方向反射率分布関数（BRDF）モデルを適用し、

（d）サンプリングしたBRDF値を、シーンのフレーム内の物体のサーフェスシェーディングのために光反射率のテクスチャマップとして記憶し、

（e）シーンのフレーム内の物体の表面上の点について法線方向ベクトルに対応するサンプリングされたBRDF値を適用することによってリアルタイムレンダリングの間に物体のサーフェスシェーディングを実行すること、をコンピュータにより実現するプログラム。

【請求項10】 法線方向ベクトルの分布が、所与の形式の表面からの物理的光反射率の標準モデルに基づくことを特徴とする請求項9記載のプログラム。

【請求項11】 法線方向ベクトルの分布のサンプリングが、単位画像サイズに正規化された上半球空間の法線方向ベクトルの離散的増分で得られることを特徴とする請求項10記載のプログラム。

【請求項12】 BRDFモデルが、トランスースパロウ（Torrance-Sparrow）モデル、フォン（Phong）モデルおよびストラウス（Strauss）モデルよりなる群から選択されることを特徴とする請求項9記載のプログラム。

【請求項13】 BRDFモデルが修正シュリック（Schlick）モデルであることを特徴とする請求項9記載のプログラム。

【請求項14】 BRDF値が、法線方向ベクトルのサンプリングに索引づけられたルックアップテーブルとして記憶されることを特徴とする請求項9記載のプログラム。

【請求項15】 物体の表面が他の表面テクスチャ特性を備えないものであり、物理的光反射率のサーフェスシェーディングが1パスで実行されることを特徴とする請求項9記載のプログラム。

【請求項16】 物体の表面が他の表面テクスチャ特性

によりテクスチャ化されており、物理的光反射率のサーフェスシェーディングが2以上の他のパスで他の表面テクスチャ特性に関するシェーディングと結合されることを特徴とする請求項9記載のプログラム。

【請求項17】 サーフェスシェーディングを実現するプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体であって、コンピュータに、

(a) コンピュータグラフィックス(CG)プログラムの開発の間にシーンの物体の表面の表面特性およびジオメトリパラメータを決定し、

(b) シーンのカadフレームについて、物体の表面を照らす入射光方向およびシーンの物体を見る射出光方向を決定し、

(c) 物体の表面の入射光および射出光方向ならびに表面特性およびジオメトリパラメータに基づきシーンのフレーム内の物体の表面からの光反射率に関する法線方向ベクトルの分布のサンプリングのための光反射率値を計算するために選定した双方向反射率分布関数(BRDF)モデルを適用し、

(d) サンプリングしたBRDF値を、シーンのフレーム内の物体のサーフェスシェーディングのために光反射率のテクスチャマップとして記憶し、

(e) シーンのカadフレーム内の物体の表面上の点について法線方向ベクトルに対応するサンプリングされたBRDF値を適用することによってリアルタイムレンダリングの間に物体のサーフェスシェーディングを実行させるプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

【請求項18】 法線方向ベクトルの分布が、所与の形式の表面からの物理的光反射率の標準モデルに基づくことを特徴とする請求項17記載の記録媒体。

【請求項19】 法線方向ベクトルの分布のサンプリングが、単位画像サイズに正規化された上半球空間の法線方向ベクトルの離散的増分で得られることを特徴とする請求項18記載の記録媒体。

【請求項20】 BRDFモデルが、トランスースパロウ(Torrance-Sparrow)モデル、フォン(Phong)モデルおよびストラウス(Strauss)モデルよりなる群から選択されることを特徴とする請求項17記載の記録媒体。

【請求項21】 BRDFモデルが修正シュリック(Schlick)モデルであることを特徴とする請求項17記載の記録媒体。

【請求項22】 BRDF値が、法線方向ベクトルのサンプリングに索引づけられたルックアップテーブルとして記憶されることを特徴とする請求項17記載の記録媒体。

【請求項23】 物体の表面が他の表面テクスチャ特性を備えないものであり、物理的光反射率のサーフェスシ

ェーディングが1パスで実行されることを特徴とする請求項17記載の記録媒体。

【請求項24】 物体の表面が他の表面テクスチャ特性によりテクスチャ化されており、物理的光反射率のサーフェスシェーディングが2以上の他のパスで他の表面テクスチャ特性に関するシェーディングと結合されることを特徴とする請求項17記載の記録媒体。

【請求項25】 画像処理装置であって、

(a) コンピュータグラフィックス(CG)プログラムの開発の間にシーンの物体の表面の表面特性およびジオメトリパラメータを決定する手段と、

(b) シーンのカadフレームについて、物体の表面を照らす入射光方向およびシーンの物体を見る射出光方向を決定する手段と、

(c) 物体の表面の入射光および射出光方向ならびに表面特性およびジオメトリパラメータに基づきシーンのフレーム内の物体の表面からの光反射率に関する法線方向ベクトルの分布のサンプリングのための光反射率値を計算するために選定した双方向反射率分布関数(BRDF)モデルを適用する手段と、

(d) サンプリングしたBRDF値を、シーンのフレーム内の物体のサーフェスシェーディングのために光反射率のテクスチャマップとして記憶する手段と、

(e) シーンのカadフレーム内の物体の表面上の点について法線方向ベクトルに対応するサンプリングされたBRDF値を適用することによってリアルタイムレンダリングの間に物体のサーフェスシェーディングを実行する手段と、

を備えることを特徴とする画像処理装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、たとえば、コンピュータグラフィックスの分野、詳細には、より高速な処理のために記憶したテクスチャマップを使用するコンピュータグラフィックス(CG)のサーフェスシェーディング方法、その方法を実現するプログラム、その方法を記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体、および、画像処理装置に関する。

【0002】

【従来の技術】コンピュータグラフィックス(CG)システムは、あるシーンの数学的に記述された物体を表現するデジタルデータからフレームごとに表示画像を創成する。CGシステムは近年、コンピュータ生成による特殊効果、アニメーション映画、対話型3Dビデオゲームおよび、デジタルメディアでの他の対話型または3D効果を創成するうえで、注目すべきものである。それらは、娯楽や宣伝広告、CAD、フライトシミュレーション/訓練、および他の多くの用途に広範に使用されている。

【0003】高度なCG用途では、全体のCGメディア

プログラムおよび付随するシーンや物体のデータベースを作成するために、シリコン・グラフィックス (Silicon Graphics, Inc.) 社の子会社であるエイリアス・ウェーブフロント (Alias Wavefront, Inc.) 社 (オンタリオ州トロント、カナダ) により販売されているMAYA (登録商標) 開発プラットフォームといったCG開発プラットフォームが使用される。MAYA (登録商標) 開発プラットフォームは、先進のインタフェース、ワークフロー、フレキシビリティおよびデブス機能を有する、3Dモデリング、アニメーションおよびレンダリングソフトウェアパッケージである。MAYAは、キーフレームおよびコンストレインツの設定、インバースキネマティクス、スケルトンへのサーフェスアタッチング、キャラクタモデリング、NURBSモデリング、キャラクタエクスプレッション、リジッド/ソフトボディ用のパーティクル/ダイナミクススイート、テクスチャリングを含むモデリングおよびアニメーションに使用される多数のツール、さらに、ノードベースシェーダ、アンチエイリアシング、モーションブラーおよび選択的レイトレーシング/レイキャスティングを含むレンダリング用ツールを備える。MAYAの核心には、そのスクリプト言語であるMELがある。すべてのアクション、インタフェースのすべての部分およびすべてのツールは、MELを用いて記述され呼び出される。従って、MELによって、新しいツールやツールの組合せを作成する、インタフェースを完全に修正する、そしてMAYAを他のソフトウェアプログラムと結合することが可能である。MAYA (登録商標) 開発プラットフォームに関するさらなる情報は、アンドリュー・ピアース (Andrew Pierce)、ケルビン・スン (Kelvin Sung) 著『MAYAソフトウェアレンダリング: 技術概要 (MAYA Software Rendering: A Technical Overview)』(Alias/Wavefront刊, 1998, 2000) から得ることができる。

【0004】開発されたCGメディアプログラムおよび、「SHOT」データファイルと称するデータファイルは、その後CGメディアプログラムの視覚的表示に描画され得る。そのレンダリングプロセスは、多数の異なるレンダリングタスクを含む「ワールドタスク (World Task)」で動作する。多くのレンダリングタスクは、複数のCPUを使用する並行処理によって得られる効率を助成する多数の独立オペレーションを含む。これを行うことができるレンダラの1つは、ピクサー・アニメーション・スタジオズ (Pixar Animation Studios) 社 (カリフォルニア州エメリービル) が開発したRENDERMAN (登録商標) レンダラである。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかし、先端のCGシステムによってさえ、レンダリングの計算集約度および視覚的にリッチなCGシーンの大きなデータサイズは、画質に関して妥協を行わなければならない大きな計算的負担を課し得る。例えば、イメージシーン内の物体の表面の光/色のシェーディングは一般に、記憶された表面特性データから物体の表面上の各点について表面テクスチャを計算し、選定した光反射率モデルに従って各当該点の光反射率特性を計算し、そしてそのシーンの個々の照明源 (放射光、環境光、拡散光および鏡面反射光) からの光ベクトルを適用することによって各当該点からの反射光の値 (一般に、その鏡面反射成分および拡散成分) を計算することを必要とする。使用され得る各種光反射率モデルの中で、表面物質特性による光相互作用の物理に基づくもの、例えば双方向反射率分布関数 (BRDF) は、レンダリング品質に関して最も正確であるが、計算するには最も高額 (集約的) である。その結果、BRDFのような物理的光反射率モデルを用いるサーフェスシェーディングは、リアルタイムレンダリングエンジンでの使用を妨げられてきた。

【0006】従って、本発明の主たる目的は、リアルタイムCGレンダリングにおいて物理的光反射率モデルの使用を可能にするようなCGのサーフェスシェーディング方法、その方法を実現するプログラム、その方法を記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体、および、画像処理装置を提供することである。本発明の詳細な目的は、リアルタイムCGレンダリングにおける物理的光反射率モデルとして双方向反射率分布関数を利用することである。

【0007】

【課題を解決するための手段】上記課題を解消し、目的を達成するため、本発明の第一の態様によれば、コンピュータグラフィックス (CG) のサーフェスシェーディング方法は、コンピュータグラフィックス (CG) プログラムの開発の間にシーンの物体の表面の表面特性およびジオメトリパラメータを決定すること、シーンのフレームについて、物体の表面を照らす入射光方向およびシーンの物体を見る射出光方向を決定すること、物体の表面の入射光および射出光方向ならびに表面特性およびジオメトリパラメータに基づきシーンのフレーム内の物体の表面からの光反射率に関するサンプリングするレンジの法線方向ベクトルについて光反射率値を計算するために選定した双方向反射率分布関数 (BRDF) モデルを適用すること、サンプリングしたBRDF値を、シーンのフレーム内の物体のサーフェスシェーディングのために光反射率のテクスチャマップとして記憶すること、シーンのフレーム内の物体の表面上の点について法線方向ベクトルに対応するサンプリングしたBRDF値を適用することによってリアルタイムレンダリングの間に物体のサーフェスシェーディングを実行することを含むもの

である。

【0008】本発明の技法は、コンピュータグラフィックス（CG）プログラムの開発の間に選定したBRDFモデルを使用して、レンダリングにおいて後に使用されるテクスチャマップとして法線方向ベクトルのサンプリングレンジについて光反射率値を計算する。BRDFモデルは、所与の形式の表面について法線方向ベクトルの分布の標準モデルとともに適用され、BRDF値は、サンプリングレンジの法線方向ベクトルに索引づけられたルックアップテーブルとして計算され記憶される。リアルタイムレンダリングの間に、サーフェスシェーディングは、記憶されたBRDF値を探索するためにいずれかの所与の点の法線方向ベクトルを使用することによって容易に処理することができる。BRDF光反射率値によるシェーディングは、例えば毛髪や顔の造作によりテクスチャ化された顔の皮膚表面といった、他の表面テクスチャ特性のシェーディングと1または複数のパスにおいて結合することができる。このようにして、物理的光反射率モデルのリッチなトーンが、リアルタイムレンダリングの間に高度にテクスチャ化された表面についても得られる。標準的な形式の光反射率モデル（トランススパーロウ：Torrance-Sparrow、フォン：Phong、ストラウス：Straussなど）の他、修正された形式のBRDFモデル（例えばシュリック：Schlick）もまた、BRDFテクスチャマップを得るために使用できる。

【0009】また、本発明の第二の態様によれば、コンピュータグラフィックス（CG）のサーフェスシェーディング方法を実現するプログラムは、コンピュータグラフィックス（CG）プログラムの開発の間にシーンの物体の表面の表面特性およびジオメトリパラメータを決定すること、シーンのフレームについて、物体の表面を照らす入射光方向およびシーンの物体を見る射出光方向を決定すること、物体の表面の入射光および射出光方向ならびに表面特性およびジオメトリパラメータに基づきシーンのフレーム内の物体の表面からの光反射率に関するサンプリングするレンジの法線方向ベクトルについて光反射率値を計算するために選定した双方向反射率分布関数（BRDF）モデルを適用すること、サンプリングしたBRDF値を、シーンのフレーム内の物体のサーフェスシェーディングのために光反射率のテクスチャマップとして記憶すること、シーンのフレーム内の物体の表面上の点について法線方向ベクトルに対応するサンプリングしたBRDF値を適用することによってリアルタイムレンダリングの間に物体のサーフェスシェーディングを実行することを含むものである。

【0010】また、本発明の第三の態様によれば、コンピュータグラフィックス（CG）のサーフェスシェーディング方法を実現するプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体は、コンピュータに、コンピ

ュータグラフィックス（CG）プログラムの開発の間にシーンの物体の表面の表面特性およびジオメトリパラメータを決定すること、シーンのフレームについて、物体の表面を照らす入射光方向およびシーンの物体を見る射出光方向を決定すること、物体の表面の入射光および射出光方向ならびに表面特性およびジオメトリパラメータに基づきシーンのフレーム内の物体の表面からの光反射率に関するサンプリングするレンジの法線方向ベクトルについて光反射率値を計算するために選定した双方向反射率分布関数（BRDF）モデルを適用すること、サンプリングしたBRDF値を、シーンのフレーム内の物体のサーフェスシェーディングのために光反射率のテクスチャマップとして記憶すること、シーンのフレーム内の物体の表面上の点について法線方向ベクトルに対応するサンプリングしたBRDF値を適用することによってリアルタイムレンダリングの間に物体のサーフェスシェーディングを実行させることを含むものである。

【0011】また、本発明の第四の態様によれば、画像処理装置であって、コンピュータに、コンピュータグラフィックス（CG）プログラムの開発の間にシーンの物体の表面の表面特性およびジオメトリパラメータを決定する手段と、シーンのフレームについて、物体の表面を照らす入射光方向およびシーンの物体を見る射出光方向を決定する手段と、物体の表面の入射光および射出光方向ならびに表面特性およびジオメトリパラメータに基づきシーンのフレーム内の物体の表面からの光反射率に関するサンプリングするレンジの法線方向ベクトルについて光反射率値を計算するために選定した双方向反射率分布関数（BRDF）モデルを適用する手段と、サンプリングしたBRDF値を、シーンのフレーム内の物体のサーフェスシェーディングのために光反射率のテクスチャマップとして記憶する手段と、シーンのフレーム内の物体の表面上の点について法線方向ベクトルに対応するサンプリングしたBRDF値を適用することによってリアルタイムレンダリングの間に物体のサーフェスシェーディングを実行する手段とを備えるものである。

【0012】

【発明の実施の形態】以下、添付図面を参照して、本発明の実施の形態について詳細に説明する。本発明に従ったサーフェスシェーディング方法の好ましいインプリメンテーションを、テクスチャ化表面との光の相互作用に物理的光反射率モデルの例を用いて以下に詳述する。しかし、本発明の一般原理が、他の形式の表面テクスチャ特性および物理的光反射率モデルを含むレンダリングにも同様に広範な適用可能性を有することを理解すべきである。

【0013】イメージシーンにおける物体のサーフェスシェーディングは、従来、記憶された表面特性およびジオメトリパラメータから物体の表面上の個々の点について表面テクスチャ特性を計算し、そしてその点からの光

反射率値を計算することによって、レンダリングにおいて行われる。各点の反射光は、物体への様々な照明の入射光源（放射光、環境光、拡散光および鏡面反射光）に基づき計算される。従来のサーフェスシェーディングにおける光の照明および反射の詳細については、アディソン・ウェズレー出版社（Addison-Wesley Publishing Company）出版のシリコン・グラフィックス（Silicon Graphics, Inc.）社による「公開GLプログラミングガイド（Open GL programming Guide）」の第6章「ライティング」に言及されている。

【0014】従来のCG技法では、物体の表面は、（球形、卵形、平坦などの）物体の輪郭上に包まれている微小面鏡の集合として考えられ得る。微小面は、微細な局所レベルにおいて（それぞれの法線方向ベクトルによって表現される）変化する方位を有し、観察される点の近傍における光の複雑な散乱により多数の微小面から反射する複雑な光反射経路を結果として生じ得る。この複雑な光散乱は、その特徴的な光反射率「テクスチャ」を備える表面を与える。表面の光反射率テクスチャのモデリングは、見る者に対し、例えばスポット反射を伴う光沢表面の単純なモデルとは対照的に、よりリッチに描画された表面の画像を与える。しかし、物体の表面上の個々の点に関する微小面からの複雑な光散乱の計算は、不可能でないとしても、リアルタイムレンダリングにとって膨大に時間を費やすタスクとなるであろう。

【0015】光反射率の計算は、双方向反射率分布関数（BRDF）およびBRDFライティング技法の概念を用いてある程度簡素化できる。BRDF概念では、微細な局所レベルでの微小面からの複雑な光の相互作用は無視され、代わりに、表面上の点の光反射率が、点への入射光方向、その点からの射出光方向（視点方向）および光の波長に基づいてモデル化される。従って、BRDFは、デカルト座標ではなく極座標ジオメトリに関する光の方向ベクトルおよびパラメータの関数として記述できる。BRDF関数について返される光反射率値は、分析的な光反射率モデルに近似する数学関数を評価することによって、または現実の表面の経験的測定値をサンプリングすることによって得ることができる。

【0016】クック・トランス（Cook-Torrance）、トランス・スパーロウ（Torrance-Sparrow）、フォン（Phong）、ワード（Ward）、ストラウス（Strauss）および他のモデルを含む広範な視覚的に興味深い光反射率効果を生じる従来の分析モデルが開発されている。一般に、異なる形式の物質の光反射率特性をモデリングする際には、異なるモデルが有用である。例えば、Wardモデルは、ブラッシングされた金属などの異方性表面の反射率特性のモデリングを得意とする。クック・トランスモデルは、銅および金といった多数の種類の反射性金属

や、変化する粗さの程度を備えるプラスチックをシミュレートする際に効果的である。分析モデルと対照的に、BRDF値はまた、ゴニオレフレクトメータのような測定装置による物理的測定を通じて取得することもできる。多くの異なる形式の表面について取得されたBRDF値は、いくつかの学術機関や営利企業の図書館から入手可能である。さらなる詳細については、クリス・ウィーン（Chris Wynn）著「BRDFベースライティング入門（Introduction to BRDF-Based Lighting）」（Nvidia Corporation出版、2000）と題する論文に言及されている。

【0017】BRDFモデルは、各種形式の表面からの複雑な光散乱を計算する代わりに光反射率値を導出するための有用な方法として提起されているが、それらはリアルタイムCGレンダリングにおいて広く使用されていない。その理由は、それらが、広範囲に使用されている従来のコンピュータグラフィックスハードウェアにとってやはり過度に計算集約的だからである。

【0018】本発明では、選定したBRDF関数が、CGプログラムの開発中に光反射率テクスチャマップを生成するために使用され、リアルタイムレンダリングにおける以後の使用のために記憶される。テクスチャマップは、極座標のサンプリングレンジに及ぶ法線方向ベクトルに索引づけられた光反射率値のルックアップテーブルとして記憶される。レンダリング中、物体の表面は、その表面の点に属する対応する法線方向ベクトルの記憶された光反射率値を検索することによってシェーディングされる。このようにして、表面からの光反射率のBRDFモデリングのリッチさが、リアルタイムレンダリングの間にBRDFモデルを使用するコンピュータ処理のコストを要せずに、サーフェスシェーディングに組み込まれ得る。この手法は、従来のハードウェアおよび標準マルチパス技法を使用するリアルタイムレンダリングの要請に良好に適する。人間の顔といったテクスチャ化表面のシェーディングには特に有利である。本発明に従ったサーフェスシェーディングへのBRDFテクスチャマップの応用の例について以下に説明する。BRDFテクスチャマップの数学の詳細な解説は、後述する。

【0019】図1は、CGプログラムの開発の間に光反射率テクスチャマップを作成するために使用されるBRDFモデルを例示する。BRDFモデルは、光ベクトルLの否定によって表現される入射光方向、視点ベクトルVによって表現される射出光方向、点Pにおける表面の方位を表現する法線方向ベクトルN、そして点Pのまわりの表面を定義する表面接線ベクトルTおよび表面法線ベクトルBに関して考えることができる。ベクトルは、サンプリングされている点Pの法線方向ベクトルに対するそれぞれの対応する表面射影および角度に関して極座標において定義される。



【0020】本発明では、物体の表面上の各点の複雑な光散乱分析が無視される。代わりに、グローバルな光反射率テクスチャマップが、モデル化されている物体の表面上の点の方位のレンジを表現する法線方向ベクトルの分布について生成される。これは、図2に例示するように、仮想球形モデルの上半球における法線方向ベクトルの分布として考えられる。ベクトルの分布は、BRDFモデルによりモデル化されている表面の表面特性およびジオメトリを表現する。前述の通り、所与の形式の表面に関する法線方向ベクトルの分布は、選定した常法で入手可能なBRDFサーフェスモデルに基づいて得ることができる。例えば、ブラッシングされた金属で作られた平坦な反射性表面のBRDFサーフェスモデルは、(大きさおよび方向に関して)法線方向ベクトルのある特徴的な(異方性)分布を有する。曲面の高反射性の平滑表面のBRDFモデルは、法線方向ベクトルのまったく異なる(等方性)分布を有するであろう。

【0021】物体の表面のBRDFテクスチャマップは、拡散成分および鏡面反射成分の評価によって実行される。BRDF値の計算は、各波長について4次元(4D)関数であり、従って、それはRGBライティングモデルの場合に3次元空間への5次元関数のマッピングである。極座標での2次元テクスチャマップは、5次元BRDF関数を表現するために使用される。2次元テクスチャマップは、図2に例示するように、表面の点のレンジを表現する上半球における法線方向ベクトルの分布に関するBRDF値として考えられる。所与の表面特性およびジオメトリについて決定された法線方向ベクトルの分布は、所要のレベルの視覚的分解能に十分なそのレンジについて離散的な角度増分でサンプリングされる。法線方向ベクトルはまた、所与の単位画像サイズに、例えば図3に例示するように区間 $[-1, 1]$ において正規化される。

【0022】BRDF関数パラメータ(大きさおよび角度)は、入射光ベクトル $L$ 、視点ベクトル $V$ および法線方向ベクトル $N$ について導出される。BRDF値の実際の計算はその後、導出された関数パラメータおよび光反射率関数の数学モデルを使用して行われる。トランスポーズバロウ、フォン、ストラウスなどといった従来の光反射率関数が使用できる。これらの手法において、BRDF値の拡散成分は、ランベルト的であり、表面幾何学的減衰または微小面分布によって影響されないと仮定することができる。シュリック(Schlick)と称する修正された手法も使用することができ、それは、表面特性を拡散成分および鏡面反射成分の両方について考慮する。この手法は、従来のBRDFモデルより計算が速いと判明している。それは、拡散成分および鏡面反射成分を、和を取るのではなく、相互に乘じることによって結合する。

【0023】BRDF光反射率テクスチャマップについ

て計算された値は、法線方向の離散化増分に索引づけられたルックアップテーブルとして記憶される。BRDFテクスチャマップは、個々の物体表面、光源の方向およびシーンにおける視点の方向について計算される。物体の表面法線がフレームごとに変化しない場合、BRDF値は不変のままである。従って、非変形物体の場合、すべてのフレームごとについてBRDFテクスチャマップを再計算する必要はまったくない。BRDFテクスチャマップは、CGプログラムのためのシーンデータの一部として記憶される。リアルタイムレンダリングの間に、シーンの物体の表面上のあらゆる点のBRDF値は、そのシーンのその点について指定された法線方向ベクトルに基づき検索され、そのシーンの関係する光源のシェーディング値を導出するために使用される。図4(A)、(B)、(C)および(D)には、トランスポーズバロウモデルに基づく球面の4つのビューのシェーディング結果の例が図示されており、図7(A)、(B)、(C)および(D)にはシュリックモデルに基づく4つのビューが図示されている。

【0024】物体の表面は、平滑な表面といった他の表面テクスチャ特性がないものとしても、または毛髪および眉やくちびるのような顔の造作を備えたテクスチャ化フェースといった高度にテクスチャ化された表面であってもよい。テクスチャのない表面では、従来のBRDFモデルを使用して、鏡面反射成分は1パスで表面上でマップされ得る。従来のBRDFによってマップされた非テクスチャ化フェースのシェーディング結果の例は、図5(A)および(B)に図示する。物体がテクスチャ化されている場合、その表面は色を拡散させるので、従って、BRDFテクスチャマップの拡散成分および鏡面反射成分が使用される。従来のBRDFモデルでは、拡散成分はランベルト的とみなされ、拡散係数を使用することによって照明プロセスのハードウェア実行に一体化され得る。拡散成分は最初のパスで物体の表面のテクスチャと結合され、鏡面反射成分は第2のパスでシェーディングに付加される。従来のBRDFによってマップされたテクスチャ化フェースのシェーディング結果の例は、図6(A)および(B)に図示する。

【0025】修正シュリックBRDFモデルでは、一方は拡散成分が優位であり、他方は鏡面反射成分が優位である、2つのテクスチャマップ値が使用される。表面がテクスチャを備えない場合、拡散成分および鏡面反射成分を結合する1つのBRDFテクスチャだけが1パスで使用される(サーフェス形式: シングル)。シュリックBRDFによってマップされた非テクスチャ化フェースのシェーディング結果の例は、図8(A)および(B)に図示する。表面がテクスチャ化されている場合、シェーディングは3パスで進行する。最初のパスでは、物体はその表面テクスチャを伴い描かれるが照明を伴わない。第2のパスで拡散優位BRDFテクスチャが最初の

パスの結果と混合され、第3のパスで鏡面反射優位BRDFテクスチャが混合される(サーフェス形式:ダブル)。シュリックBRDFによってマップされたテクスチャ化フェースのシェーディング結果の例は、図9(A)および(B)に図示する。

【0026】図10を参照すれば、論理図により本発明の好ましいインプリメンテーションにおける全体のプロセスステップを例示している。以下に説明する画像処理は、メモリに記録されたプログラムにしたがって実行されるものである。この画像処理は、一台のマシンで実行するようにしてもよく、複数のマシンをネットワークで接続して分散処理させるようにしてもよい。この画像処理を実現するプログラムは、CD-ROM、DVDなどの記録媒体に記録させておき、コンピュータにより実行する際に、その記録媒体から読み出してメモリに格納させた状態で実行するようにしてもよく、あるいは、ネットワークを介して他のコンピュータから供給されることによりメモリに格納させた状態で実行するようにしてもよい。

【0027】CGプログラムの開発の間に、シーンの物体の表面特性およびジオメトリがブロック101に示す通り決定される。表面特性およびジオメトリに基づき、ブロック102で、物体の法線方向ベクトルNの分布がシーンの光方向 $\mathbf{l}$ および視点方向 $\mathbf{V}$ に対して決定される。ブロック103で、使用される特定のBRDF光反射率モデルが表面の形式に応じて選定される。ブロック104では、BRDF関数パラメータが、物体に関する光方向 $\mathbf{l}$ 、視点方向 $\mathbf{V}$ および法線方向ベクトルNのパラメータに基づいて計算される。計算された関数パラメータおよびBRDFモデルを使用して、ブロック105でBRDF値がシーンの物体表面のテクスチャマップとして計算および記憶され、ブロック106に示す通り、例えばCGビデオゲームまたは映画の初期化に際してリアルタイムレンダリングの開始を待つシーンデータとして保持される。

【0028】リアルタイムレンダリングの間に、シーンの「ワールドタスク」が生成され、そのシーンの各フレーム、その物体および照明源を定義し、ブロック107に示すように、各フレームのシェーディング関数が呼出される。典型的なシェーディングタスクの場合、シェーディング関数は、そのシーンにおける物体の表面上の各点で照明源から反射された表面の光および色を計算する。最初に、シーンデータとともに記憶された物体の表面特性および色特性が検索される。その後、シーンの光源から各点で反射された光が計算される。ブロック108に示す通り、記憶されたBRDFテクスチャマップは、物体の表面上の点の光反射率値を計算するために適用される。ブロック109に示すように、従来のBRDFモデルにより、シェーディングは2パスで進行し、拡散成分およびスペクトル成分を付加する。シュリックの

BRDFモデルでは、ブロック110に示す通り、シェーディングは、最初に表面テクスチャの特徴をシェーディングし、次に拡散優位成分、その後スペクトル優位成分を混合する、3パスで進行する。

【0029】要約すれば、本発明は、物理的光反射率テクスチャマップがCG開発段階において計算および記憶され、その後リアルタイムレンダリング段階において適用される、リアルタイムCGレンダリングの改良されたサーフェスシェーディング技法を提供する。この手法は、従来のBRDFモデルや修正Schlick BRDFモデルといった物理的光反射率モデルのリッチなテクスチャリングをリアルタイムレンダリングにおけるシェーディングに使用できるようにする。BRDFテクスチャマップは、物体の表面上の微小面の頂点が可能である限り、あらゆる任意のジオメトリにも適用できる。この手法は、従来のハードウェアおよびマルチパスシェーディング技法を使用するリアルタイムレンダリングに良好に適するとともに、BRDFテクスチャマップを、皮膚などのテクスチャ化表面との組合せにおいて使用可能にする。

【0030】本発明の原理の上記の説明により多くの他の修正および変更が考案され得ることが理解される。すべてのそのような修正および変更は、添付請求の範囲において定義される本発明の精神および範囲内にあるものとしてみなされるものである。

【0031】以下にBRDFテクスチャマップの数学の詳細な解説について説明を加える。まず微小面ベースのテクスチャマッピングについて説明する。

【0032】セクション1. 序

反射率モデルは、シーンにおける物体の照明を、従って画像のピクセルカラーを与えるので、あらゆるレンダリングエンジンにおける重要な機能である。コンピュータグラフィックスには多数の反射率モデルが導入されている。あるものは経験的なものであり、あるものは物理に基づいている。BRDFは、表面物質との光の相互作用に関連する物理法則をシミュレートすることから、多くのレンダリングエンジンにおいて使用されている物理ベースのモデルである。レンダリングパッケージにおけるその成功にもかかわらず、BRDFは、各フレームごとに関数を計算するための高額なコストゆえに、リアルタイムレンダリング用途においてそれほど使用されてこなかった。そこで、リアルタイムレンダリングエンジンにおいて物理ベースの反射率モデル(BRDF)を使用する技法を提起する。

【0033】セクション3では、BRDFテクスチャ生成について説明する。セクション4では、BRDFの評価に必要なパラメータおよび幾何学エンティティを詳説する。アルゴリズムの詳細およびテクスチャマッピングはセクション5、6では提示する。最後にセクション7では、技法の応用およびインプリメンテーションの詳細



を例示する。

【0034】セクション2. 背景

光と表面物質の相互作用は、表面点Pにおける入射ラジアンズ ( $E_i$ ) を射出イラジアンズ ( $I_r$ ) と関係づけることとしてモデル化することができる。関係関数  $\rho$  は

$$\rho = \frac{I_r}{E_i} \quad (1)$$

【数2】

$$E_i = L_i(\vec{N} \cdot \vec{L})d\omega \quad (2)$$

【数3】

$$I_{r\lambda} = \int_{L_\omega} \rho_\lambda(P, \vec{V}, \vec{L}) I_{i\lambda}(P, -\vec{L}) (\vec{N} \cdot \vec{L}) d\omega \quad (3)$$

$I_{r\lambda}(P, \vec{V})$  は方向  $\vec{V}$  でのイラジアンズ出発点Pである。  
 $I_{i\lambda}(P, -\vec{L})$  は方向  $-\vec{L}$  からのラジアンズ到達点Pである。  
 $\rho_\lambda(P, \vec{V}, \vec{L})$  は表面点PにおけるBRDF値である。  
 $\nu$  は入射光の可能な方向である。  
 $d\omega$  は方向  $\vec{L}$  の周囲の差分立体角である。  
 $\vec{N}$  は表面法線である (単位ベクトル)。  
 $\vec{L}$  は光へ方向である (単位ベクトル)。  
 $\vec{V}$  は観察者へ方向である (単位ベクトル)。  
 $P$  はサンプリングされている表面点である。

【0035】2. 1 BRDFパラメータの定義  
 所与の表面点におけるBRDF計算にはいくつかの幾何

学エンティティの定義を必要とする。(図1参照)

【数4】

$\vec{V}$ は射出方向	, $\theta_r \equiv (\vec{V}, \vec{N})$ ,
$\vec{L}$ は入射方向	, $\theta_i \equiv (\vec{L}, \vec{N})$ ,
$\vec{N}$ は表面法線	, $\phi_r \equiv (\vec{V}, \vec{T})$ ,
$\vec{T}$ は表面接線	, $\phi_i \equiv (\vec{L}, \vec{T})$ ,
$\vec{H}$ は二等分線ベクトル	, $\phi_h \equiv (\vec{H}, \vec{T})$ ,
$\vec{H}$ は $\vec{H}$ の射影	, $\beta \equiv (\vec{V}, \vec{H})$ ,
$\vec{B}$ は従法線ベクトル	, $\alpha \equiv (\vec{H}, \vec{N})$

【0036】伝統的にBRDFの用語では2種類の表面特性が区別される。すなわち、ディフューズおよびスペキュラーである。BRDF計算はその後、ディフューズ成分およびスペキュラー成分の評価によって実行される。この識別はほとんどのBRDF研究 ( $\rho = \rho_d + \rho_s$ ) において行われる。アンビエント成分が時として追加されるが、それはディフューズ成分の一部として表現することができる。

【0037】セクション3. BRDFテクスチャ  
 BRDFは、各波長について4D (4次元) 関数であるので、従ってそれは、RGBモデルの場合、3次元空間への5次元関数である。我々は、個々の表面点において、 $\theta_i$ ,  $\theta_r$ ,  $\phi_i$ ,  $\phi_r$  からRGBに使用可能なBRDFを有するBRDF (5次元関数) を表現するために2次元テクスチャマップを使用したい。2次元BRD

Fテクスチャにアクセスするには2つのパラメータ (U, V) が必要である。

【0038】BRDFテクスチャは上半球 (法線の方向の分布) について計算される。このプロセスは上半球の法線方向を離散化することになる。上半球における方向は以下によって定義される (図2参照)。

【数5】

$$\vec{N} = \begin{cases} X \in [-1, 1] \\ Y \in [-1, 1] \\ Z \in [0, 1] \end{cases} \text{ with } X^2 + Y^2 + Z^2 = 1$$

【0039】所与の組  $(X, Y) \in \{-1, 1\} \times \{-1, 1\}$  について、対応する入力方向ベクトルを計算し、次にBRDF評価のための関係するパラメータ、 $N$ ,  $T$ ,  $B$ ,  $\theta_i$ ,  $\theta_r$ ,  $\phi_i$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_h$ ,  $H$ ,  $\alpha$ ,

$\beta$ を計算する。なお、数式以外、すなわち、説明上は、 $V, L, N, T, H, B$ のベクトルに関して、ベクトルを示す矢印の記号を文字から除き、ベクトル $V, L, N, T, H, B$ と称するとともに、 $H$ の射影に関して、射影を示すバー(ー)を文字から除き、射影 $H$ と称する。

【0040】セクション4. BRDFパラメータの計算

$$\vec{N} = \begin{cases} X \in [-1, 1] \\ Y \in [-1, 1] \\ Z = \sqrt{1 - X^2 - Y^2} \end{cases} \text{ since } X^2 + Y^2 + Z^2 = 1$$

【0041】もし $X$ および $Y$ が単位円の外にあれば、それらは正規化によって円に戻される。すなわち、

【数7】

$$\begin{aligned} l_n &= X^2 + Y^2 \\ \text{if } (l_n > 1) &\quad \text{then } l_n = \sqrt{l_n} \\ X &= X/l_n \\ Y &= Y/l_n \end{aligned}$$

【0042】 $Z$ は、そのとき、新しい $X$ および $Y$ の値から計算される。

【数8】

$$\vec{N} = (X, Y, \sqrt{1 - X^2 - Y^2}).$$

【0043】4. 2 接線および従法線ベクトルの計算  
接線および従法線ベクトルを計算するには、ベクトル $N$ に対する直交ベクトルが必要となる。その直交ベクトル

$$\vec{N} \wedge \vec{N}_{xz} = \vec{T} \begin{pmatrix} \frac{-XY}{\sqrt{X^2+Z^2}} \\ \frac{X}{\sqrt{X^2+Z^2}} \\ \frac{-Y}{\sqrt{X^2+Z^2}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

(ベクトル $T$ , ベクトル $B$ , ベクトル $N$ )は3次元空間正規直交基底である。その後、ベクトル $B$ は、ベクトル

$$\vec{N} \wedge \vec{T} = \vec{B}$$

【0046】4. 3 BRDFの角およびベクトル  
ベクトル $T, B, N$ を得たので、次に、入射光および視点ベクトル $L$ および $V$ について、 $\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r$ , ベクトル $H$ を計算することができる。また $\phi_h, \alpha, \beta$ も計算できる。BRDFパラメータは(ベクトル

#### 4. 1 法線ベクトル(方向)の計算

法線ベクトル $N(X, Y, Z)$ を定義するために、区間 $[-1, 1]$ において $X$ および $Y$ をサンプリングし、 $Z$ はそのベクトルが正規化されるということによって導出される。

【数6】

の選択は、接線および従法線ベクトル $T$ および $B$ の方向を規定する。ベクトル $N(X, Y, Z)$ が与えられたとき、ベクトル $N'_{xz}(-Z, 0, X)$ がベクトル $N$ に対して直交する。

【0044】

【数9】

$$\vec{N}_{xz} = \begin{cases} \frac{-Z}{\sqrt{X^2+Z^2}} \\ 0 \\ \frac{X}{\sqrt{X^2+Z^2}} \end{cases} \text{ is orthogonal to } \vec{N}.$$

接線ベクトル $T$ は法線ベクトル $N$ に直交である。それは法線ベクトル $N$ とベクトル $N_{xz}$ とのクロス乗積によって得られる。

【0045】

【数10】

$N$ と $T$ とのクロス乗積によって計算される。

【数11】

(6)

$T$ , ベクトル $B$ , ベクトル $N$ )の基底において定義される。

【0047】

【数12】

$$\vec{H} = \frac{\vec{L} + \vec{V}}{\|\vec{L} + \vec{V}\|}$$

$$\begin{aligned}\theta_i &= \cos^{-1}(\vec{L} \cdot \vec{N}) & \theta_r &= \cos^{-1}(\vec{V} \cdot \vec{N}) \\ \phi_i &= \tan^{-1}\left(\frac{\vec{L} \cdot \vec{B}}{\vec{L} \cdot \vec{T}}\right) & \phi_r &= \tan^{-1}\left(\frac{\vec{V} \cdot \vec{B}}{\vec{V} \cdot \vec{T}}\right) \\ \alpha &= \cos^{-1}(\vec{H} \cdot \vec{N}) & \phi_h &= \tan^{-1}\left(\frac{\vec{H} \cdot \vec{B}}{\vec{H} \cdot \vec{T}}\right) \\ \beta &= \cos^{-1}(\vec{V} \cdot \vec{H}) & &= \cos^{-1}(\vec{L} \cdot \vec{H})\end{aligned}$$

in basis  $(\vec{T}, \vec{B}, \vec{N})$

$$\begin{aligned}L_{TBN}^{-1} &= \begin{pmatrix} \sin \theta_i \cos \phi_i \\ \sin \theta_i \sin \phi_i \\ \cos \theta_i \end{pmatrix}, & V_{TBN}^{-1} &= \begin{pmatrix} \sin \theta_r \cos \phi_r \\ \sin \theta_r \sin \phi_r \\ \cos \theta_r \end{pmatrix} \\ H_{TBN}^{-1} &= \begin{pmatrix} \sin \alpha \cos \phi_h \\ \sin \alpha \sin \phi_h \\ \cos \alpha \end{pmatrix} & &= \begin{pmatrix} L_{TBN}^{-1} + V_{TBN}^{-1} \\ \|\vec{L} + \vec{V}\| \end{pmatrix}\end{aligned}$$

この時点でBRDFテクスチャを計算するために必要なすべてのパラメータを得た。

【0048】セクション5. BRDFテクスチャの計算およびマッピング

前章で定義されたパラメータにより、法線方向の分布（上半球）を表現するBRDFテクスチャの計算が可能になる。

【0049】5.1 アルゴリズム

テクスチャイメージのサイズは法線方向の分布のサンパ

$$\begin{aligned}\text{For } (I, J) &\in \{0, \text{IMSIZE} - 1\} \times \{0, \text{IMSIZE} - 1\} \\ X &= \frac{2I}{\text{IMSIZE} - 1} - 1 \\ Y &= \frac{2J}{\text{IMSIZE} - 1} - 1\end{aligned}$$

$$(X, Y) \in \{-1, 1\} \times \{-1, 1\}$$

$((1n = X^2 + Y^2) > (1 - \epsilon))$  ならば、 $1n = \sqrt{1n + \epsilon}$ ;  $X = X / 1n$ ;  $Y = Y / 1n$

$Z = \sqrt{1 - X^2 - Y^2}$ よりZを計算する。

$N$  (ベクトル) =  $\{X, Y, Z\}$

式(5)および(6)からベクトルTおよびベクトルBを計算する。前章の公式より $\theta_i$ ,  $\theta_r$ ,  $\phi_i$ ,  $\phi_r$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\phi_h$ を計算する。この $(X, Y)$ の組のBRDF値を計算する。

【0051】ジオメトリへのテクスチャマップを実行するために、BRDFテクスチャの計算式に基づき各頂点について新しいテクスチャ座標を評価しなければならない。新しいテクスチャ座標は頂点法線（正規化）の関数である。頂点法線 $N(X, Y, Z)$ の座標を使用する。

【0052】

【数14】

$$\begin{aligned}U &= \frac{X+1}{2} \\ V &= \frac{Y+1}{2}\end{aligned}$$

リング分解能である。テクスチャサイズが大きくなればなるほど、サンプリングはより正確になる。所与のテクスチャイメージサイズIMSIZEについて、IおよびJはピクセル座標である（行Jおよび列I）。 $(X, Y) \in \{-1, 1\} \times \{-1, 1\}$ を保証するために、XおよびYは以下のように計算される。（図3参照）

【0050】

【数13】

光源および／またはビューカメラのすべての新しい位置および／または方向について、BRDFテクスチャが再計算されなければならない。BRDFのテクスチャ座標は、物体の法線が変化しない限り不変のままである。非変形物体の場合、すべてのフレームごとにBRDFテクスチャ座標を再計算する必要はまったくない。

【0053】セクション6. BRDF値の計算

BRDFテクスチャ値（ピクセルカラー）の実際の計算は、既存の方法（トランススパーロウ：Torranee-Sparrow, フォン：Phong, ストラウス：Strauss等々）のいずれかを用いて行うことができる。発明者は上記の方法のいくつかを実施した。それらのすべての手法において、BRDFのディフューズ部分はランベルト的であると仮定し、表面幾何学的減衰および微小面分布のいずれによっても影響されなかった。

【0054】

【数15】

$$\rho_{\lambda}(\theta_i, \theta_r, \alpha, \beta, \phi_h) = \frac{k_d}{\pi} C_{\lambda} + \frac{k_s}{4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r} F_{\lambda}(\beta) G(\theta_i, \theta_r) D(\alpha, \phi_h) \quad (7)$$

$$k_d + k_s = 1$$

シュリック (Schlick) は、必要に応じてディフューズ成分およびスペキュラー成分の両方の表面特性を考慮する、最適化された関数による BRDF 計算の別な新しい手法を提起している。予想通り、わずかな拡張によりテクスチャマップへの使用を可能にするこの新しい手法のインプリメンテーションは、より良好な視覚的結果をもたらす、従来の BRDF 計算よりも高速である。この新しい手法は、スペクトルおよび方向成分を計算して BRDF を評価する。それらは、総和ではなく (ディ

フューズおよびスペキュラー)、相互に乘じることによって結合される。2つの形式の表面が導入される。すなわち、シングル (1 スペクトル成分および 1 方向成分) およびディフューズ (2 スペクトル成分および 2 方向成分)。

【0055】以下の公式は、シュリックのテクニカルレポート (Christophe Schlick; Technical Report, LaBR I, 1998) から引き出される。BRDF 成分

【数16】

$$\begin{aligned} \text{Spectral} : S_{\lambda}(u) &= C_{\lambda} + (1 - C_{\lambda})(1 - u)^5 \\ \text{Directional} : D(t, v, l, w) &= \frac{a}{\pi} + bB(t, v, l, w) + \frac{c}{ldw} \Delta \quad \text{with } a + b + c = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

Surface types

$$\begin{aligned} \text{Single} : \rho_{\lambda}(t, u, v, l, w) &= S_{\lambda}(u) D(t, v, l, w) \\ \text{Double} : \rho_{\lambda}(t, u, v, l, w) &= S_{\lambda}(u) D(t, v, l, w) + (1 - S_{\lambda}(u)) S'_{\lambda}(u) D'(t, v, l, w) \end{aligned} \quad (9)$$

with

$$\begin{aligned} t &= \cos \alpha, & u &= \cos \beta \\ v &= \cos \theta_r, & l &= \cos \theta_i \\ w &= \cos \phi_h \end{aligned}$$

インプリメンテーションでは、シュリックのテクニカルレポートで導入された BRDF パラメータ  $r$ ,  $p$  および、フレネル項 ( $c/ldw$ )  $\Delta$  を使用するかどうかを指定するために付加的なフレネル (fresnel) パラメータを使用した。

【0056】

【数17】

$$\begin{aligned} b &= 4r(1-r) \\ a &= (r < 0.5) ? 0 : 1-b \\ c &= (r < 0.5) ? ((fresnel ? 1 - b : 0) : 0 \end{aligned}$$

新しいパラメータのフレネルに加え、ベックマン分布関数を使用した。

【0057】

【数18】

$$\begin{aligned} G &= \min(1, \frac{2tu}{u}, \frac{2tu}{v}) \\ Z &= \frac{r}{(1 + (r-1)t^2)^2} \\ A &= \sqrt{\frac{p}{p^2(1-w^2) + w^2}} \\ B &= \frac{AZG}{4\pi ul} \\ \Delta &= (t > \cos(dw)) ? \frac{1}{ldw} : 0. \end{aligned}$$

【0058】セクション7. 応用とインプリメンテーション

発明者はダンサー (DANCER) レンダリングエンジンの合成スキンスェーダに BRDF テクスチャマップ技法を応用した。画家が描いたスキントクスチャイメージが用意された。BRDF テクスチャは、手法に応じて2または3のパスで物体のサーフェスシェーディングのためにスキントクスチャと結合される。

【0059】7. 1 ディフューズおよびスペキュラー (従来の BRDF)

BRDF を使用するシェーディングは、次式によって要約することができる。

【数19】

$$I_{r\lambda} = \rho_a I_{a\lambda} + I_{i\lambda}(\vec{N} \cdot \vec{L}) d\omega (k_d \rho_d + k_s \rho_{s\lambda}) \quad (10)$$

テクスチャイメージが物体のディフューズカラーとして使用される場合、テクスチャを伴うシェーディング方程式は以下になる。

【0060】

【数20】

$$\begin{aligned} I_{r\lambda} &= k_a \rho_a O_{a\lambda} + I_{i\lambda}(\vec{N} \cdot \vec{L}) d\omega (k_d \rho_d O_{d\lambda} + k_s \rho_{s\lambda} O_{s\lambda}) \\ \rho_a &= \pi \rho_d. \end{aligned} \quad (11)$$

BRDFのディフューズ成分はランベルト的であるとみなされる。それは拡散係数、 $k_d = (kd/\pi) d\omega$ を与えることによってハードウェア照明プロセスに組み入れることができる。その場合、ディフューズ照明、 $I_i$  (ベクトルN/ベクトルL)  $d\omega (kd/\pi) Od$ は最初のレンダリングパスでテクスチャと結合されるはずである。我々はスペキュラーBRDFテクスチャを計算しさえすればよい。

【0061】第2のパスは、スペキュラー成分をシェーディングに付加することによってスペキュラーBRDFテクスチャを第1のパスの結果とブレンドする。(図6 (A), (B) 参照)

【0062】7. 2 スペクトルおよび方向 (シュリックBRDF)

新しい手法によりBRDFテクスチャを正確に適用するために、2つのテクスチャが必要である。1つはスペキュラー優位のものであり、1つはディフューズ優位のものである。シェーディングは、BRDFテクスチャがテクスチャ化されたスキン (表面) と結合される場合は3パスで処理され、表面がシングル形式のものである場合は1パスで行われる。

【0063】3つのパスは、以下のように進められる。最初のパスにおいて、物体は照明を伴わず表面テクスチャイメージだけで描かれる。照明は計算され、BRDFテクスチャに保持される。

【0064】第2のパスは、テクスチャを乗じることによってディフューズ優位BRDFテクスチャを最初のパスの結果とブレンドする。

【0065】第3のパスは、加算によってスペキュラー優位BRDFテクスチャを第2のパスの結果とブレンドする。表面はダブル形式としてみなされる (図9 (A) および (B) 参照)。

【0066】テクスチャを備えない表面にシェーディングする時には、ディフューズおよびスペキュラー (そして恐らくアンビエント) を結合する1つのBRDFテクスチャだけが使用される。(図8 (A) および (B) 参照)

【0067】セクション8. 結び

BRDF値を離散化および記憶するためにテクスチャマップを使用する技法を提起した。生成されたBRDFテクスチャは、頂点法線が得られる限り任意のジオメトリ上に適用され得る。BRDFテクスチャのサイズは、BRDFを評価するために費やされる計算時間を規定する。本発明の手法は、ハードウェアで使用可能なテクスチャリング機能を用いてBRDF情報と表面テクスチャイメージとを混合することに良好に適する。

【0068】

【図面の簡単な説明】

【図1】所与の表面点におけるBRDFパラメータ定義の図である。

【図2】テクスチャマップの法線方向ベクトルの分布を例示する図である。

【図3】所与の画像サイズの物体のBRDFテクスチャマップを例示する図である。

【図4】(A), (B), (C), (D) はそれぞれ4つの異なる視角に関する従来のBRDFテクスチャを例示する図である。

【図5】(A), (B) はそれぞれフェースモデルへの従来のBRDFテクスチャマップの適用を例示する図である。

【図6】(A), (B) はそれぞれテクスチャ化フェースモデルへの従来のBRDFテクスチャマップの適用を例示する図である。

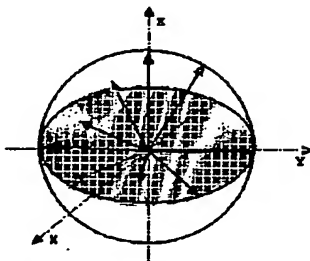
【図7】(A), (B), (C), (D) はそれぞれ4つの異なる視角に関する物体上の異なる (Schlick) BRDFテクスチャマップを例示する図である。

【図8】(A), (B) はそれぞれフェースモデルへの異なるシュリック (Schlick) のBRDFテクスチャマップの適用を例示する図である。

【図9】(A), (B) はそれぞれテクスチャ化フェースモデルへの異なるBRDFテクスチャマップの適用を例示する図である。

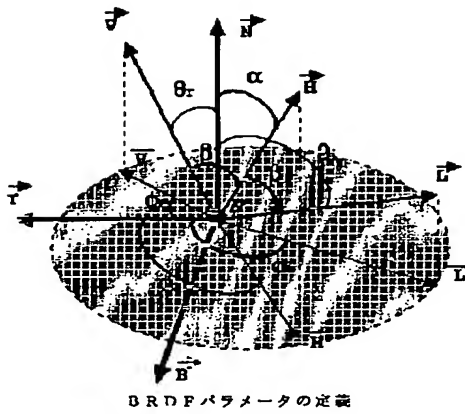
【図10】テクスチャ化された物体へBRDFテクスチャマップを適用させた場合のフローチャートである。

【図2】

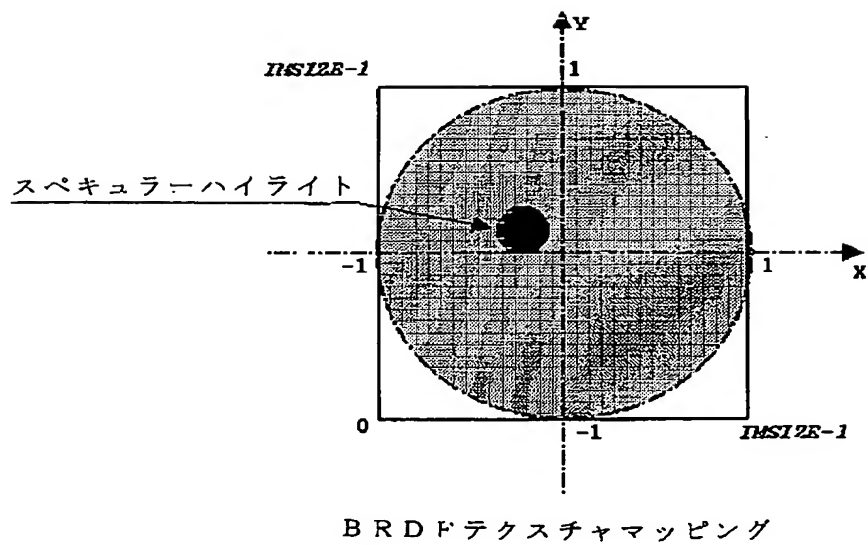


半球における法線方向ベクトルの分布

【図1】

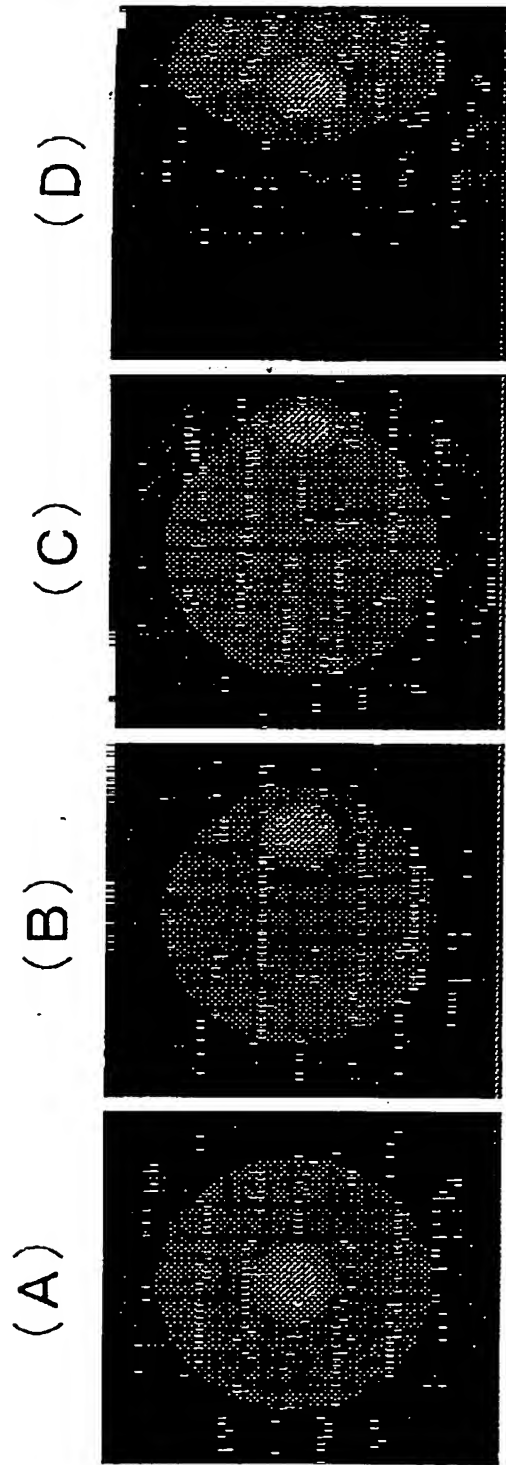


【図3】



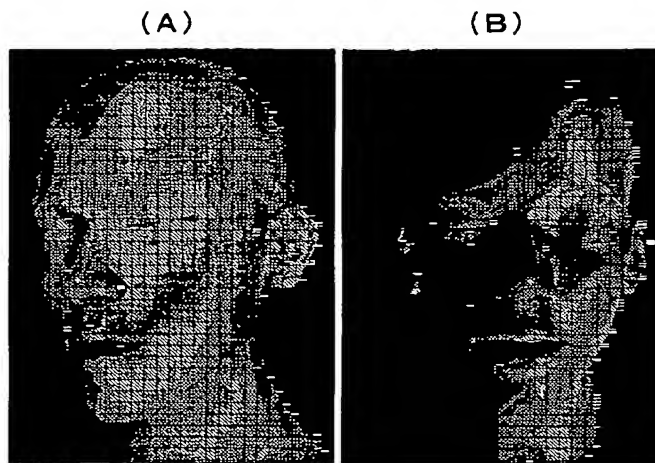


【図4】



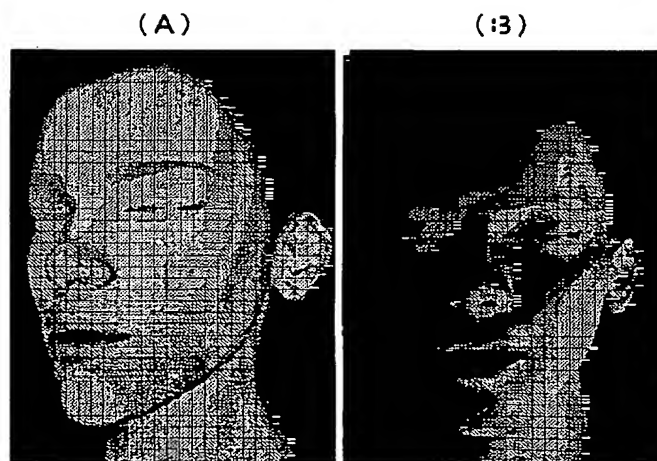
各種アングルに関するBRDFテクスチャ  
(Torrance-Sparrow)

【図5】



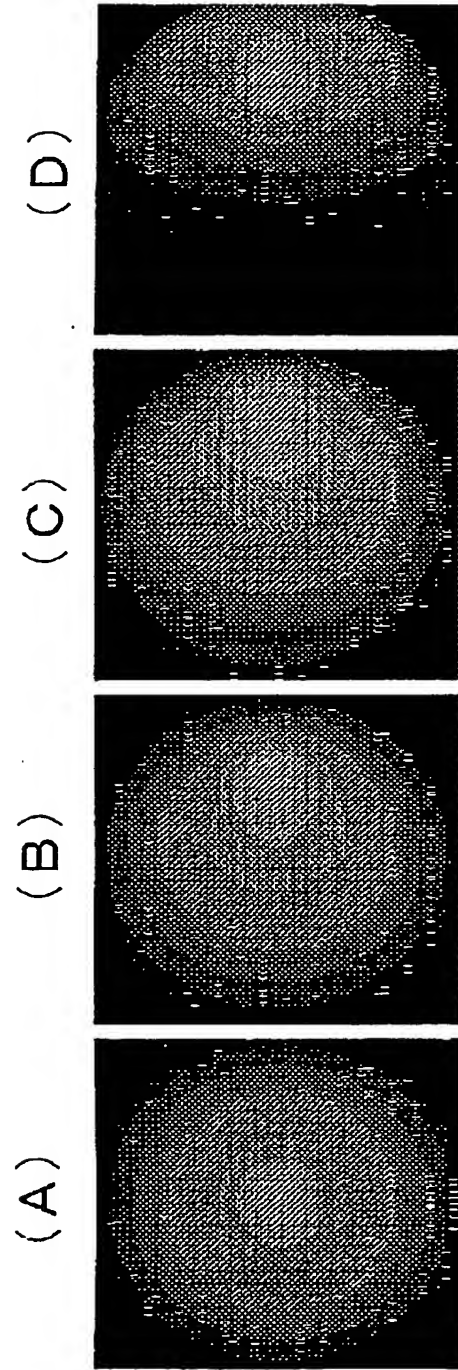
フェースモデルにマップされたBRDFテクスチャ

【図6】



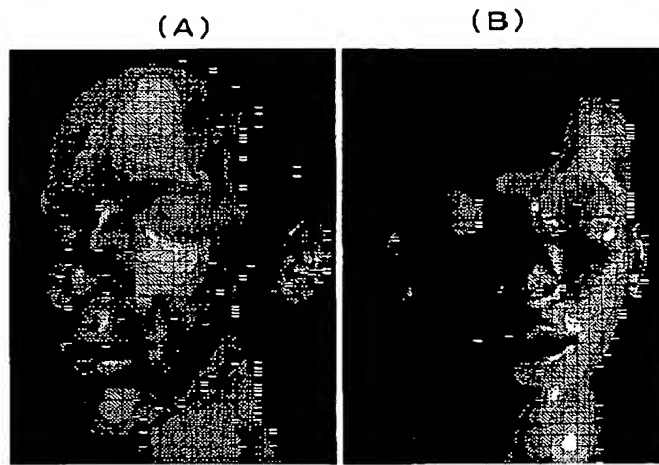
テクスチャ化フェースモデルにマップされたBRDFテクスチャ

【図7】



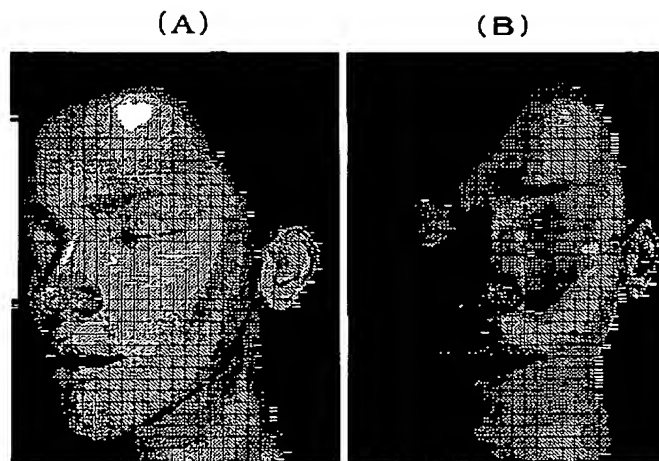
各種アングルに関するBRDFテクスチャ (Schlick)

【図8】



フェイスモデルにマップされたBRDFテクスチャ

【図9】



テクスチャ化フェイスモデルにマップされたBRDFテクスチャ

【図10】

